



Design og optimering af vingetipper for vindmøller Slutrapport

Sørensen, Jens Nørkær; Shen, Wen Zhong; Zhu, Wei Jun; Borbye, Jakob; Okulov, Valery; Mikkelsen, Robert Flemming; Gaunaa, Mac; Réthoré, Pierre-Elouan Mikael; Sørensen, Niels N.

Publication date:
2011

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Sørensen, J. N., Shen, W. Z., Zhu, W. J., Borbye, J., Okulov, V., Mikkelsen, R. F., Gaunaa, M., Réthoré, P-E. M., & Sørensen, N. N. (2011). *Design og optimering af vingetipper for vindmøller: Slutrapport*. DTU Mekanik.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Slutrapport: EFP07-II 33033-0243

Design og Optimering af Vingetipper for Vindmøller

J.N. Sørensen, W.Z. Shen, W.J. Zhu, J. Borbye
V.L. Okulov, R. Mikkelsen
DTU Mekanik

M. Gaunaa, P.-E. Rethore, N.N. Sørensen
Risø DTU

DTU Mekanik
Institut for Mekanisk Teknologi

Marts 2011

Design og Optimering af Vingetipper for Vindmøller

Introduktion

Når luft strømmer omkring en vinge, dannes der en hvirvel ved vingetippen. Denne hvirvel er afgørende for opdriften på vingen, og kendskab til de detaljerede strømningsforhold omkring vingetippen er nødvendig for at estimere vingens effektivitet. Derfor er vingetippens udformning en vigtig parameter ved design af en moderne vindmølle. Der kan dels være tale enten om mindre modifikationer af et eksisterende design eller om tilføjelse af en ny struktur på vingen, en såkaldt winglet. Erfaringer med tilføjelse af winglets på flyvinger viser, at det er muligt at opnå samme ydelse med en væsentligt kortere vinge. Tilsvarende designændringer for vindmøllevinger vil kunne give anledning til mindre, lettere og billigere vindmøller. Samtidig har vingetippens udformning betydning for den støj der genereres fra møllen. Ved det rette design af vingetippen vil denne støj kunne reduceres. Det er projektets formål, at foreslå og analysere nye udformninger af vingetipper til vindmøller med henblik på at optimere ydelsen. For mindre møller vil der være tale om modifikationer af eksisterende designs, for større vindmøller vil de nye designs også omfatte tilføjelse af winglets. Under projektet er en række simple vingetipper og deres strømningstopologi blevet undersøgt, og betydningen af forskellige designvariable er fastlagt med henblik på at etablere hvilke, der har størst betydning for effektiviteten. I denne fase er der først og fremmest benyttet numeriske strømningsberegninger ved anvendelse af Navier-Stokes koden *EllipSys*. De detaljerede strømningsberegninger har dels tilvejebragt oplysninger om både lastfordelinger og om strømlinjernes topologi på vingens overflade. Strømningens topologi er væsentlig for forståelsen af vingens effektivitet og til at forklare de forhold, der er bestemmende for et optimalt design. Som et supplement til de viskose Navier-Stokes beregninger, er der også foretaget inviskose beregninger med anvendelse af lifting-line teori. Dette er en simpel teknik til at bestemme lastfordelingen langs vingetippen, i det tilfælde hvor viskose effekter kan negligeres. Lifting-line teorien er mange gange hurtigere end CFD til at beregne og optimere en vinges planform. En stor del af projektet har da også været fokuseret på at forbedre lifting-line metodens nøjagtighed. Ud over at danne grundlaget for at forbedre tipudformninger, er beregningerne også benyttet til at forbedre den såkaldte tipkorrektion. Tipkorrektionen blev oprindeligt indført som en ad-hoc korrektion til BEM (Blade Element-Momentum) teknikken. Korrektionen har dog kun været sporadisk valideret, og det er tidligere blevet vist at den har en iboende inkonsistens, således at den bl.a. underbestemmer lastfordelingen ved vingetippen. Baseret på de numeriske resultater fra CFD beregningerne er der under projektet udviklet en forbedret tip-korrektion. I det følgende vil vi give en oversigt over de væsentligste resultater, der er opnået under projektet.

Design og optimering af tipform

Under projektet er der udviklet forskellige numeriske designmetodikker til design og optimering af vindmølle rotor. Metoderne, som alle er baseret på hvirvelteori, er benyttet til både at designe plane og ikke-plane rotorblade, herunder forskellige vingekonfigurationer med winglets. I første omgang er der benyttet klassiske modeller til optimering af rotorbladernes geometri. Den ældste rotormodel blev udviklet af Joukowsky for mere end 100 år. Denne model har dog tilsyneladende kun vundet udbredelse i Rusland; mens stort al rotordesign er baseret på Betz/Glauert's ideer. I nærværende projekt har vi dog taget begge teorier op og sammenlignet ydelse og bladgeometrier. Tilsyneladende er der ikke tidligere lavet sammenligninger mellem de to modeller. I Figur 1 er grundlaget for de to modeller vist. I Joukowsky's model (a) antages det at rotoren er belastet med en konstant cirkulation; Mens Betz' model (b) antager at den optimale cirkulation opnås når kølvandet beskriver en helisk skrueflade. Det skal bemærkes at Betz' cirkulationsfordeling stort set svarer til tip-korrektionen, som den benyttes i blade-element/momentum (BEM) teknikken.

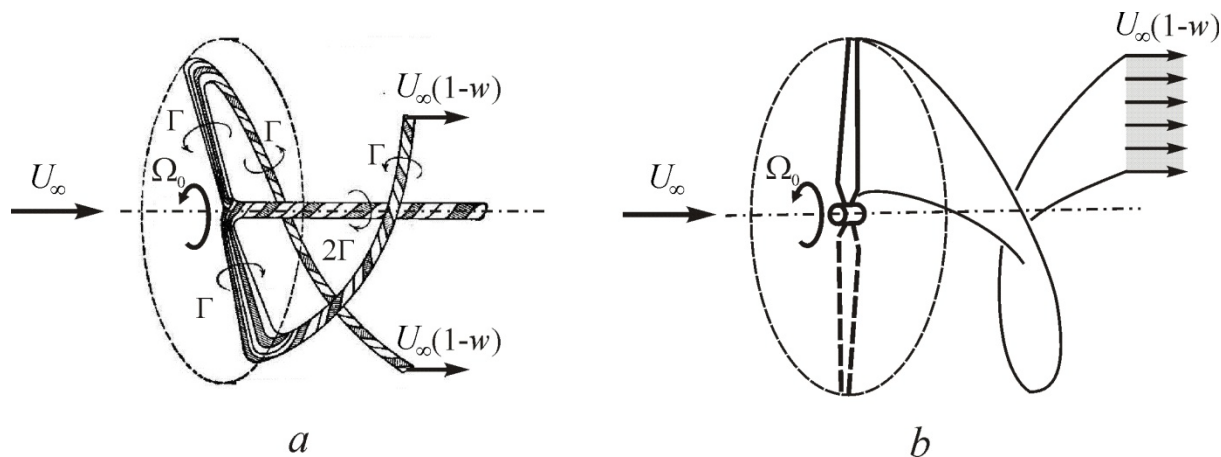
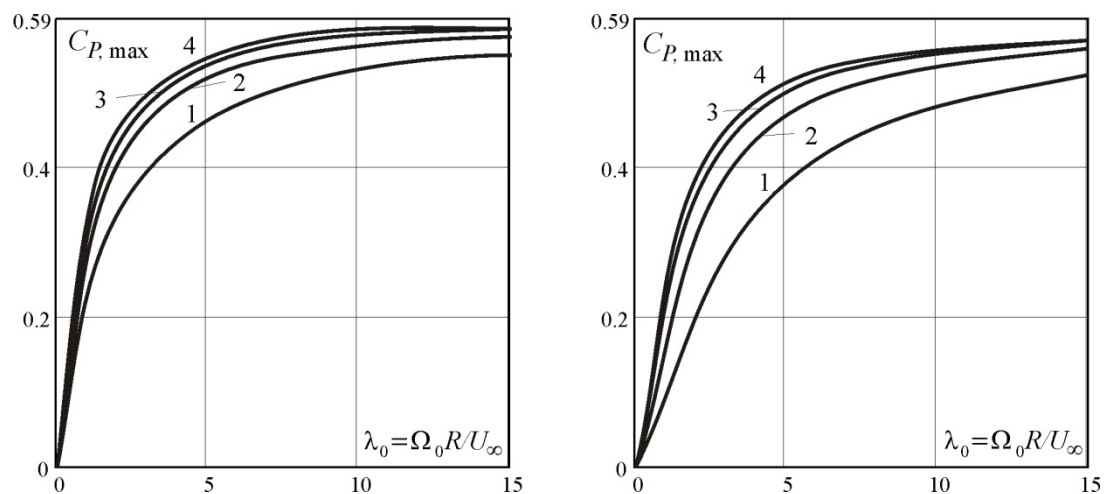
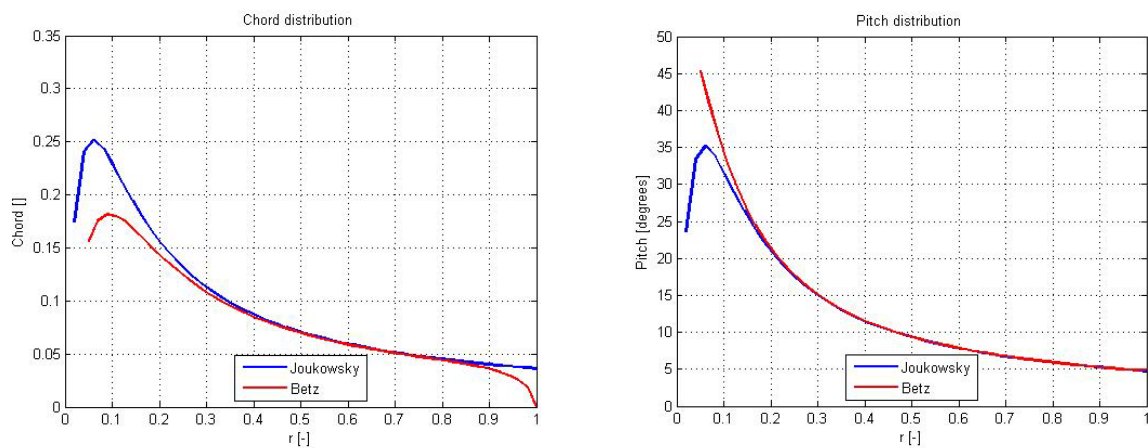


Figure 1: Skitse af hvirvelsystemer bag en optimal vindmøllerotor beskrevet ud fra
(a) Joukowsky's model og (b) Betz' model.

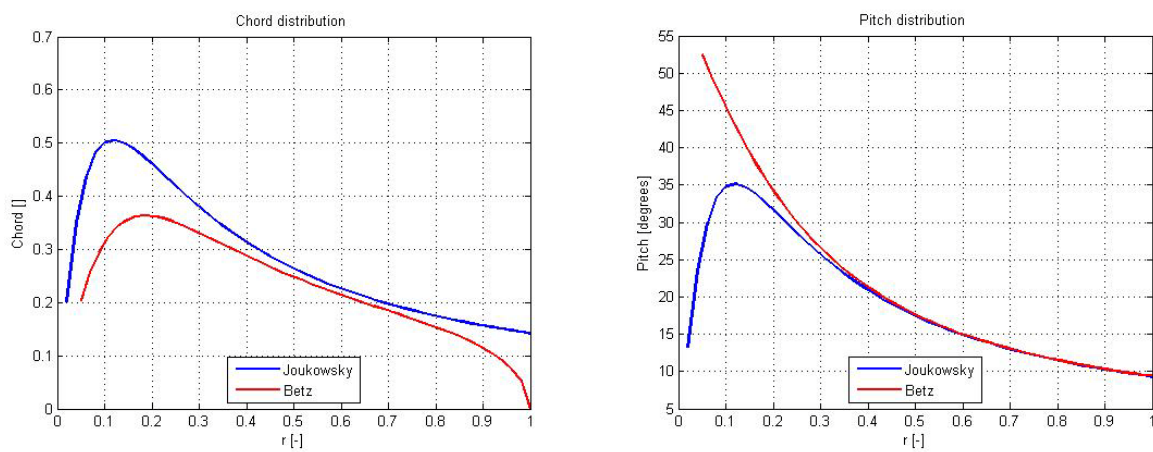
Ud fra de grundlæggende antagelser, er det muligt ved brug af hvirvel-teori at beregne rotorernes ydelse og geometriske planform. Figur 2 viser ydelsen for de to rotor som funktion af tip hastighedsforholdet (TSR) og antal af rotorblade. Ved sammenligning af de to kurveskarer, ses det tydeligt at Joukowsky rotoren for stort set alle tip hastighedsforhold har en bedre virkningsgrad end Betz rotoren. Dette er interessant, i og med at moderne rotordesign er baseret på BEM teori og dermed ikke på Joukowsky's model. En sammenligning af den geometriske udformning af de to rotor er for $TSR=8$ vist på Figur 3 og for $TSR=4$ på Figur 4.



Figur 2: Effektkoefficient, C_P , for optimal rotor som function af tiphastighedsforhold. Venstre: Joukowski rotor; Højre: Betz rotor.



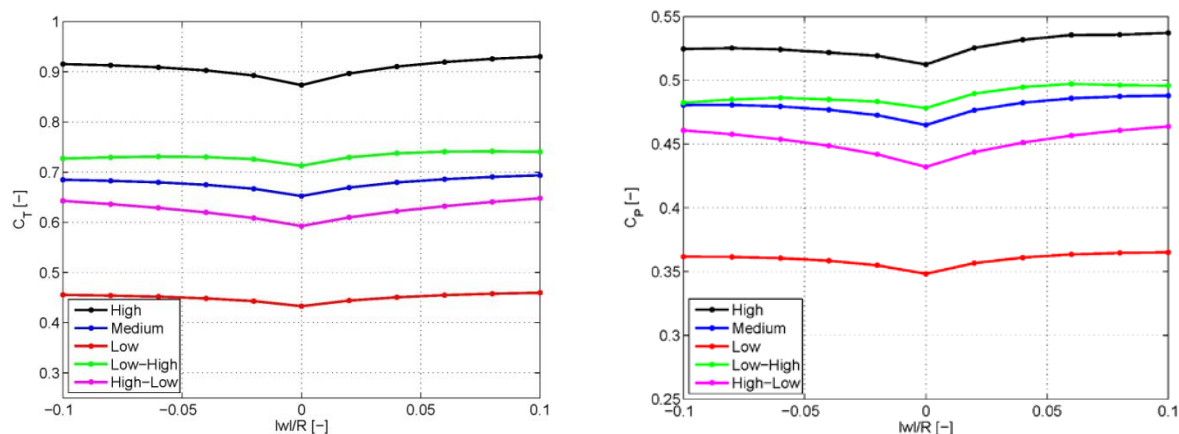
Figur 3: Sammenligning af korde- og pitch-fordeling ved tiphastighedsforholdet TSR=8.



Figur 4: Sammenligning af korde- og pitch-fordeling ved tiphastighedsforholdet TSR=4.

For en yderste effekt-producerende del af vingen, ses at pitch-fordelingen stort set er den samme for de to rotorere; mens kordefordelingen viser store forskelle. Specielt ved mindre tipfastighedsforhold er der en klar forskel i tipudformningerne mellem de to rotorere. Hvor 'Betz-rotoren's' tip har en spids sværdformet udformning, har 'Joukowsky-rotoren' generelt en bredere korde-fordeling med en afhugget tip. Som det ses på Figur 1 producerer Jukowsky-rotoren 1-2 procentpoint mere end Betz-rotoren i TSR-området 4 til 8. Dette er dog ikke blevet verificeret gennem målinger.

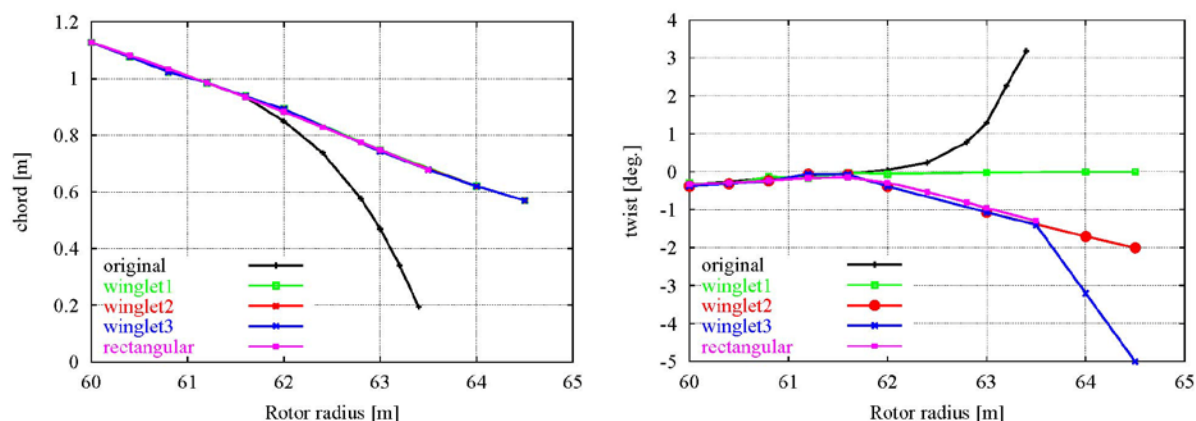
For yderligere at optimere på vingetippen er der foretaget en række beregninger for vingetipper udstyret med winglets. Der er her som udgangspunkt benyttet forskellige belastningstyper, dvs forskellige cirkulationsfordelinger, med winglets af forskellige længder påsat ved en vinkel 90 grader. Til design af de benyttede winglets og beregning af den aerodynamiske ydeevne, er der i første omgang benyttet en hvirvelmodel (lifting-line). Til verificering af denne metode er resultaterne sammenlignet med CFD-beregninger ved anvendelse af EllipSys koden. Generelt er der meget god overensstemmelse mellem beregningerne. På Figur 5 er resultatet vist, udtrykt ved thrust-koefficienten, C_T og effektkoefficient, C_P , af en række optimeringer ved brug af winglets. På figuren angiver abscissen længden af wingletten relativt til vingelængden, hvor negative værdier angiver at wingletten peger opstrøms (væk fra møllen). Som det ses fra figuren opnås den bedste virkningsgrad ved en nedstrøms pegende winglet.



Figur 5: Venstre: Thrust-koefficient som funktion af længde af winglet for forskellige belastningstyper. Højre: Effektkoefficient som funktion af længde af winglet for forskellige belastningstyper. Kurverne er udregnet for tipfastighedsforholdet $TSR=8$.

Et andet spørgsmål, som projektet har behandlet, er muligheden af at indføre winglets som 'retrofits' til eksisterende møllevinger. Hertil er der foretaget en række beregninger med forskellige tipudformninger, som vist i Figur 2. Beregninger viser at ydelsen af en eksisterende vindmølle kan forbedres med op til 1.4 % ved brug af opstrøms pegende winglets og med op til 1.8% ved brug af nedstrøms pegende winglets. Dette skal selvfølgelig sættes i relation til prisen for at foretage 'retrofittet' og den øgede belastning. Ved brug af en konventionel winglet,

defineret som en foreskrevet bøjning af en eksisterende vingetip, kan der med en 10 % høj winglet opnås op til 13 % forbedring af effektkoefficienten (C_p), baseret på den oprindelige rotorlængde. Dette skal dog sammenstilles med effekten af at forlænge vingen med en længde svarende til winglet-højden. Her vil den tilsvarende forbedring være på ca. 20 %. Konventionelle winglets vil således ikke i sig selv forbedre den aerodynamiske ydeevne, undtagen i tilfælde, hvor der er begrænsninger på møllehøjden. Endelig er der optimeret på en snoet (spiroid) vingetip. Her vil der være en gevinst på et par procent at hente i forhold til en simpel forlængelse af vingen.



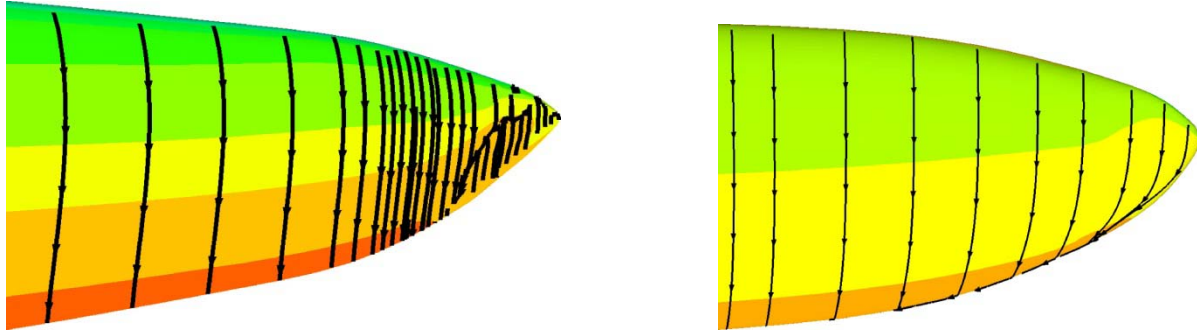
Figur 6: Korde- og vridningsfordeling af forskellige winglets.

Forbedret tipkorrektion

Der er tidligere udviklet en ny teknik til indførelse af tipkorrektionen i BEM beregningsmetoden. Denne metode er her blevet videreudviklet ved at analysere CFD beregninger af en 500 kW Nordtank mølle og den virtuelle 5MW NREL mølle. CFD beregningerne danner grundlag for beregning af profildata nær ved vingetippen. Baseret på et parametrisk studium af de beregnede profildata, er tipkorrektionen blevet yderligere forbedret. Resultaterne fra den forbedrede tipkorrektion vil fremover blive anvendt i BEM-modellen ved optimering og analyse af rotorblade. En anden effekt, som er undersøgt, er den såkaldte 'de-cambering' effekt.

Tipkorrektionen, som den i dag benyttes i BEM modellen, tager ikke fuldt hensyn til indflydelsen af kordefordelingen ved vingetippen, idet den ignorerer den såkaldte 'de-cambering' effekt. Den aerodynamiske opdrift på vinger fremkalder en ændring af strømningen omkring vingen, som reducerer indfaldsvinklen og dermed opdriften på vingen. Ved de simple beregningsmetoder beregnes de inducerede hastigheder i et enkelt punkt på vingekorden, typisk i 1/4-kordepunktet, hvorefter opdriften bestemmes ud fra 2D-profildata. Herved begås en fejl, idet de inducerede hastigheder i virkelighed varierer henover vingens korde, således at profilet oplever en svagt krummet strømning, som reducerer den effektive krumning (camber) af profilet og dermed reducerer opdriften yderligere. Denne de-cambering effekt er modelleret for simple fly-vinger og

der er fundet et relativt simpelt udtryk for størrelsen af korrektionen som funktion af opdrifts- og kordefordeling. Korrektionen varierer over længden af vingen og øges ud mod tippen, hvor effekten er signifikant. Resultaterne vil blive søgt overført til beregning af vindmøllevinger, og det er håbet at kunne anvise en relativ simpel korrektion til den hyppigt anvendte BEM-model.



Figur 7: Beregnede strømlinjer på overfladen af vingetip ved en vindhastighed på 10 m/s. Venstre: LM 19.1 vinge; Højre: NREL 5 MW vinge.

Baseret på målinger fra eksisterende målekampagner samt en række CFD beregninger, er der udviklet en ny tip-korrektion til anvendelse i forbindelse med BEM modellen. Baggrunden for den nye tip-korrektion er den såkaldte F1-funktion:

$$F_1 = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(-g \frac{B(R-r)}{2r \sin \phi} \right) \right]$$

$$g = \exp(-0.125(B\lambda - 21)) + 0.1$$

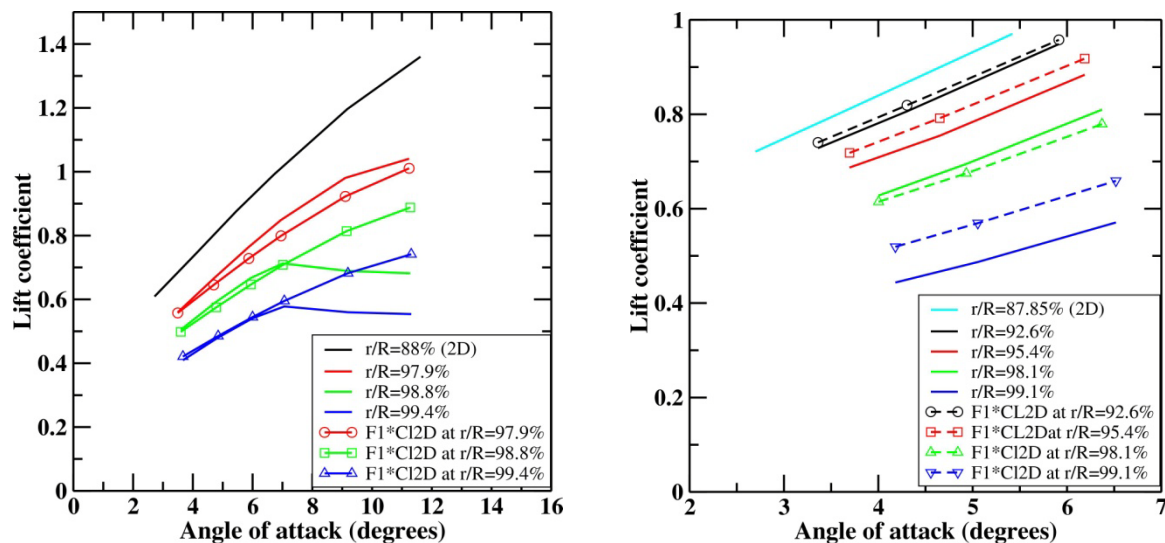
hvor B angiver antallet af rotorblade, λ er tiphastighedsforholdet, og ϕ er strømningsvinklen. For at tilpasse korrektionen til rotorblade med en skarp tipgeometri, er formlen modificeret som følger:

$$F_1 = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(-g \frac{B(R-r)^n}{2r^n \sin \phi} \right) \right]$$

$$g = \exp \left(-\frac{0.125(B\lambda - 21)}{1 - 2 \min(dc/dr)} \right) + 0.1$$

hvor dc/dr angiver den radiære gradient af kordefordelingen ved vingetippen og eksponenten n er givet som

$$n = 1 + 0.5 \min(dc/dr) \quad .$$



Figur 8: Sammenligning med opdriftskoefficienter beregnet med CFD og estimeret med den nye tip-korrektion og BEM. Venstre: LM 19.1 vinge; Højre: NREL 5 MW vinge.

Formlen for den nye tipkorrektion er valideret ved at sammenligne opdriftsfordelinger beregnet med BEM ved anvendelse af den nye tipkorrektion med CFD beregninger. Beregninger er foretaget dels for LM 19.1 rotor og dels for den virtuelle NREL 5MW rotor. På Figur 7 er vist strømlinjeplot af strømmingen i bunden af grænselaget på tippen af de to rotorere ved en vindhastighed på 10 m/s. Ved at foretage beregninger ved en række forskellige vindhastigheder, er det muligt at ekstrahere profil data for forskellige positioner nær tippen. På Figur 8 er der vist en sammenligning mellem de CFD-beregnete data og opdriftsfordelinger opnået ved brug af BEM og formelen for den nye tipkorrektion. Generelt er der en særdeles god overensstemmelse mellem de to sæt data. Dog er der afvigelser når strømmingen separerer (LM19.1) og for snit meget tæt på tippen.

Forsøg til undersøgelse af hvirvelsystem bag modelrotor

Som et spin-off af projektet, er der udført et studenterprojekt til undersøgelse af tiphvirvler generet fra en model-rotor. Hertil er der konstrueret en model af en vindmøllerotor med diameter 40 cm, som er udstyret med 3 pitch-regulerede rotorblade. Kølvan og tiphvirvler genereret af modelrotoren er undersøgt i DTU's (ISVA) vandkanal ved at foretage en række PIV (Particle Image Velocimetry) målinger og visualiseringer. PIV målingerne er foretaget i en række planer omkring rotationsaksen, inklusive området omkring vingetippen. Visualiseringerne er foretaget ved at smøre dele af vingen ind i fluorescein, som ved belysning giver en meget klar visualisering af hele hvirvelsystemet. Målingerne har tilvejebragt en række detaljerede oplysninger om hvirvelstrukturer og tipeffektens indflydelse på disse.

Strømningstopologi ved vingetip

Til undersøgelse af strømningstopologien omkring en vingetip, er der lavet et beregningsnet og CFD beregninger af strømningsforholdene omkring den virtuelle 5MW NREL rotor.

Strømningstopologien, som i dette tilfælde er de såkaldte 'limiting stream lines' eller isokurver for overfladefriktionen, er undersøgt ved hjælp af de matematiske værktøjer, der på DTU er udviklet til undersøgelse af strømningstopologier. Analysen er koblet til en analyse til identifikation hvirvelsystemet ved anvendelse af Delta-, Q- og lambda2-kriterierne. Analysen har vist, at der desværre kun er en ringe relation mellem specialpunkterne i den topologi, der dannes af vingens grænselag, og genesis af tiphvirlerne. Kun Delta-kriteriet har vist sig matematisk set, at give en kontinuert beskrivelse fra grænselag til hvirvel. Men da der ikke er en eentydig sammenhæng mellem disse, kan der ikke generelt slutes noget om tiphvirlers beskaffenhed ud fra viden om grænselagstopologi.

Stabilitet af tiphvirler

Der er foretaget en omfattende numerisk undersøgelse af stabiliteten af tiphvirler. Analysen er baseret på direkte simulering af Navier-Stokes ligninger ved anvendelse af actuator-linje metoden til generering af tiphvirvel-systemet bag en mølle. Stabiliteten af dette system er analyseret ved at påføre forskellige perturbationer upstrøms rotorbladet og derefter følge udviklingen af amplitude og fase i hvirvelsystemet. Analysen har muliggjort en kvantificering af fx den omgivende turbulens' indflydelse på hvirvlerne. Vi forventer at analysen munder ud i en simpel ligning, der redegør for størrelsen af det nære kølvand som funktion af størrelsen af den omgivende turbulens.

Støj fra vingeprofiler nær tip

En eksisterende numerisk CAA (Computational AeroAcoustics) model er blevet udvidet med højere ordens skemaer. Modellen er blevet anvendt til at beregne støj fra vingeprofiler med stump bagkant. Generelt viser beregningerne at støj genereret fra vingeprofiler med stump bagkant stiger med Mach tallet og med tykkelse af bagkanten. Endvidere er der en klar tendens at støjen bliver mere lavfrekvent når der anvendes profiler med tykke stumpe bagkanter. På grund af store beregningsomkostninger, har det ikke været muligt at foretage CAA beregninger af en hel vinge. I stedet har beregningerne været koncentreret omkring vingeprofiler i tip-regionen.

Publikationer:

1. Shen, Wen Zhong; Zhu, Wei Jun; Sørensen, Jens Nørkær. (2009). "Aeroacoustic Computations for Turbulent Airfoil Flows". *AIAA Journal*, 47(6), 1518-1527.
2. Shen, Wen Zhong; Hansen, Martin Otto Laver; Sørensen, Jens Nørkær. (2009). Determination of the angle of attack on rotor blades *Wind Energy*, 12(1), 91-98.
3. Wang, Xu Dong; Shen, Wen Zhong; Zhu, Wei Jun; Sørensen, Jens Nørkær; Chen, Jin. (2009). Shape Optimization of Wind Turbine Blades *Wind Energy*, 12(8), 781-803.
4. Ivanell, S.; Sørensen, Jens Nørkær; Mikkelsen, R.; Henningson, D. (2009). "Analysis of Numerically Generated Wake Structures". *Wind Energy*, vol: 12(1), p. 63-80.
5. Zhu, Wei Jun ; Shen, Wen Zhong ; Sørensen, Jens Nørkær. "High-order numerical simulations of flow-induced noise". *International Journal for Numerical Methods in Fluids* (ISSN:) (DOI: 10.1002/fld.2241) , (2009).
6. Sørensen, J.N. (2011). "Aereodynamic aspects of wind energy conversion". *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 43, pp. 427-448.
7. Okulov, V..L. and Sørensen, J.N. (2010). "Maximum efficiency of wind turbine rotors using Joukowsky and Betz approaches". *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 649, pp. 497-508.
8. Ivanell, S.; Mikkelsen, R. Sørensen, J.N. and Henningson, D. (2010). "Stability analysis of the tip vortices of a wind turbine". *Wind Energy*, vol. 13(8), pp. 705-715.
9. Zhu, Wei Jun ; Shen, Wen Zhong ; Sørensen, Jens Nørkær. "Study of trailing edge bluntness noise". *Proc. The Science of Making Torque from Wind 2010*, Heraklion, Crete, Greece.
10. Reuven Shenkar (2010) "Design and Optimization of Planar and Nonplanar Wind Turbine Blades Using Vortex Methods" , Master of Science thesis, MEK-FM-EP-2010-08.
11. Kasper Damkjær og Svend Petersen (2010) "PIV measurements on a wind turbine in a water flume", Bachelor of Science thesis, MEK-FM-BA-2010-01.
12. Gaunaa, M., Rethore; P.-E., Sørensen, N.N. (2011) "Risø contribution to final report of EFP-Vingetipper". Internal Risø-report.
13. Shen, W.Z., Zhu, W.J. and Sørensen, J.N. (2011) "Study on tip loss function on wind turbine blades". Internal Report, DTU Mechanical Engineering.
14. Jakob Borbye (2011) "Topological analysis of limiting streamlines on wind turbine rotors". PhD dissertation, DTU Mechanical Engineering; under preparation.